



دانشگاه صنعتی سمند

نشریه سامانه های غیرخطی در

مهندسی برق

جلد ۳ - شماره ۱ - تابستان ۱۳۹۴

صفحه ۱۰۱ تا ۱۲۱

ISSN: 2322-3146

<http://jnsee.sut.ac.ir>

چکیده

واژه های کلیدی

سیستم ناوبری اینرسی،
مکان یابی و نقشه سازی همزمان،
هواییمای بدون سرنشی،
فیلتر کالمون توسعه یافته.

موقعیت یابی و نقشه سازی همزمان (SLAM) مشکلی اساسی در زمینه ناوبری ربات های متحرک است و حل آن یکی از جذاب ترین موضوعات کاری محققین بوده و امروزه یکی از بخش های مهم سیستم های ناوبری را تشکیل می دهد. در این مقاله یک الگوریتم SLAM اینرسی کارآمد برای یک پهپاد یا یک وسیله های هوایی را ارائه شده است. ساختار SLAM اینرسی مذکور برای به کار گیری دو نوع سنسور Range/Bearing و Bearing-only مناسب بوده و نیازی به سیستم های موقعیت یاب خارجی همچون GPS و یا هر نوع اطلاعات از قبل تهیه شده ندارد. این مطالعه سیستمی جامع ارایه می کند به طوری که علاوه بر بهبود کارایی و دقت SLAM سه بعدی، بر دو مشکل اساسی نیز که در تحقیقات قبلی توجه کمی به آنها شده است غلبه می کند؛ اول اینکه کلیه درجات آزادی را برای پهپاد در نظر می گیرد یعنی تغییرات موقعیت پهپاد تنها در دو جهت U و X محدود نشده و بلکه تغییرات ارتفاع پهپاد نیز در نظر گرفته می شود، دوم اینکه محدودیتی برای موقعیت نشانه ها وجود نداشته، یعنی سیستم برای سنسور های اینرسی قادر است تمام نشانه ها را در ارتفاعات متفاوت مشاهده کند. نهایتاً با استفاده از اطلاعات پروازی یک هواییمای واقعی، صحت عملکرد الگوریتم با ارایه نتایج شبیه سازی ها به اثبات رسیده است.



Presentation of 3D and Efficient Inertial SLAM Algorithm for UAV and Its Implementation based on actual flight data in Simulation Environment

Askar Azizi¹, Hamid Nourisola², Amin Sadeghi-Emamgholi³ and
Amir Rikhtehgar Ghiasi⁴

¹M.Sc. in Electrical Control Engineering, Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran a.azizi.tu@gmail.com

² M.Sc. in Electrical Control Engineering, Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Tabriz, Iran hamidnourisola@yahoo.com

³ M.Sc. in Aerospace Engineering, Department of Electrical control Engineering, Faculty of Aerospace, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran, aammiinn.sadeghi@gmail.com

⁴ Corresponding Author, Assistant Prof., Faculty of electrical and computer engineering, university of Tabriz, Tabriz, Iran, agiasi@tabrizu.ac.ir

ABSTRACT

Keywords

Inertial navigation system,
Extended Kalman filter,
Unmanned Aerial Vehicle,
Simultaneous Localization and Mapping

Simultaneous localization and mapping (SLAM) is an important problem in a manipulator navigation robot and solving this problem is one of the interesting topics for researchers. This problem shapes important part of the navigation and guidance. In this paper, one practical inertial SLAM algorithm is presented. Construction of the inertial SLAM is suitable for using two types of sensor Range / bearing and Bearing-only and do not need GPS or any prior knowledge of its position. This paper presents general system of UAV and improves the performance and accuracy of the 3D SLAM. In addition, this method solves two main problems that previous researches have not studied; first, all degrees of freedom (DOFs) for UAV is considered. On the other hand, UAV position changes are not limited in both X and Y axes and elevation changes are considered. Second, there is no limit in landmark positions. This means that the system can observe all of the landmarks with inertial sensor in every elevation. Finally, using the actual aircraft flight data, the accuracy of the algorithm has been proven by the results of the simulations.

۱- مقدمه

با توجه به کاربردهای گوناگون و مفید هوایی‌های بدون سرنوشت (پهپادها)^۱، اعم از کاربردهای نظامی و غیرنظامی، در سال‌های اخیر محققان زیادی در این زمینه به مطالعه و بررسی پرداخته‌اند [۱-۳]. با تکامل تئوری SLAM^۲ [۴ و ۶]، کاربردهای این تئوری در پیاده‌سازی‌های عملی در محیط‌های مختلف به موضوعی جذاب تبدیل شده است. امروزه یکی از کاربردهای مهم SLAM، در پهپادها می‌باشد [۷ و ۸]. یک پهپاد، معمولاً برای اکتشاف یک محیط ناشناخته و همچنین ترسیم نقشه‌ای از محیط همراه با نشانه‌های^۳ واقع در آن، که باید مورد شناسایی قرار گیرند، به کارگرفته می‌شود. اما پهپاد بایستی این کارها را بدون استفاده از تجهیزات مکان‌یابی مانند سیستم موقعیت‌یاب جهانی (GPS)^۴ یا هر گونه اطلاعات زمینی از قبل تهیه شده، انجام دهد.

پهپادها با استفاده از تکنیک SLAM ناویری می‌کنند. تکنیک SLAM، تخمین همزمان مکان پهپاد و نشانه‌های مشاهده شده را فراهم می‌کند [۹]. در تکنیک SLAM، برای تخمین‌های ذکر شده، روش‌های فیلتری متعددی ارائه شده است که متعارف‌ترین آن‌ها فیلتر کالمن توسعه یافته (EKF)^۵ است [۱۰]. فیلتر EKF یک راه حل محبوب برای SLAM است که کاربردهای روزافزون آن را می‌توان در ربات‌های عمل کننده در محیط‌های سرپوشیده^۶ و داخلی^۵، ربات‌های زمینی در محیط‌های بیرونی و فضاهای باز^{۷ و ۱۱}، وسایل نقلیه‌ی زیرآبی [۱۲ و ۱۳] و وسایل نقلیه‌ی هوایی [۱۴] مشاهده کرد. روش EKF به طور کامل نقشه‌های موقعیت پهپاد و نشانه‌ها را از قبل تخمین می‌زنند و این بیانگر کارآبی مناسب آن است [۱۱، ۱۲ و ۱۵]. این الگوریتم برای مکان‌یابی وسیله‌ی متحرک، روشی منحصر به فرد ارایه می‌دهد و شامل کاربردهای زیادی است، از جمله: اکتشافات سیاره‌ای و یا در جاهایی که سیستم GPS آسیب دیده باشد یا در مکان‌یابی که سیگنال‌های GPS نمی‌توانند دریافت شوند. اما مهم‌تر از همه، الگوریتم SLAM می‌تواند برای مقاوم کردن سیستم ناویری استفاده شود [۱۶]. برای این‌که بتوان این الگوریتم را در ناویری استفاده کرد بایستی بتواند نشانه‌ها را بازنگری کنند که این کار به خاطر همبستگی‌های^۸ آماری که پهپاد را به نشانه‌ها مرتبط می‌کند دارای دو تأثیر مهم است: (الف) بهبود تخمین مکان نشانه‌ها، (ب) بهبود تخمین مکان پهپاد. بنابراین پهپاد یا باید محیط ناشناخته‌ی بیشتری را برای پیدا کردن نشانه‌های جدید کاوش کند و یا بایستی نشانه‌های شناسایی شده را بازنگری^۹ کند تا کیفیت مکان‌یابی را بهبود بخشد [۹]. در کاربردهای عملی به ویژه در مورد یک پهپاد، معمولاً از یک سیستم ناویری اینرسی (INS)^{۱۰} استفاده می‌شود اما در این حالت، با توجه به ماهیت فرضی^{۱۱} مکان INS احتمال افزایش خطاهای مکان‌یابی وجود دارد و این نقص، مدت زمان عملیاتی پهپاد را محدود می‌کند. برای رفع نقص مطرح شده سیستم ناویری اینرسی به الگوریتم SLAM مجهز شده و از آن با عنوان سیستم ناویری SLAM یاد می‌شود که توانایی تصحیح خطاهای INS را با استفاده از نقشه‌ای که به صورت آنلاین در حال تولید شدن است، دارد [۱۷-۲۱]. در این سیستم موقعیت وسیله و نقشه‌ی نشانه‌ها به طور همزمان و فقط با استفاده از مشاهدات نسبی مکان نشانه‌ها نسبت به مکان وسیله، تخمین زده می‌شوند. در برخی موارد نیز از الگوریتم SLAM برای تکمیل سایر سیستم‌های ناویری مانند GPS استفاده می‌شود که با این کار دقت و مقاومت سیستم GPS در هنگام افت سیگنال‌های دریافتی از ماهواره افزایش داده می‌شود [۱۸]. در دهه‌ی اخیر الگوریتم SLAM برای ناویری مورد توجه بوده است به طوری که چندین پیاده‌سازی برای SLAM در وسیله‌های زمینی [۲۲ و ۲۳]، زیرآبی [۲۴ و ۲۵] و بر روی یک وسیله‌ی هوایی بدون سرنوشت (پهپاد) [۲۶-۳۰] پیاده شده است.

1- UAVs: Unmanned Aerial Vehicle

2- SLAM: Simultaneous Localization and Mapping

1- Landmarks

2- GPS: Global Positioning System

3- EKF: Extended Kalman Filter

4- Indoor Robots

5- Outdoor Robots

6- Correlations

7- Re- Observe

8- INS: Inertial Navigation System

9- Dead-reckoning nature

در این مقاله کلیه روابط و همبستگی‌های الگوریتم SLAM اینرسی سه بعدی برای پیاده‌سازی بر روی یک پهپاد با شش درجه آزادی استخراج و تحلیل شده و الگوریتمی برای امکان پیاده‌سازی در شرایط واقعی، با استفاده از اطلاعات پروازی یک هوایی واقعی، ارائه شده است. در واقع در این مقاله سیستم جامعی برای پهپاد طراحی شده است به‌طوریکه علاوه بر افزایش کارایی و دقت SLAM سه بعدی، بر دو مشکل اساسی نیز که در تحقیقات قبلی توجه کمی به آن‌ها شده است غلبه می‌کند؛ اول اینکه کلیه درجات آزادی را برای پهپاد در نظر می‌گیرد یعنی تغییرات موقعیت پهپاد تنها در دو جهت y و X محدود نشده و بلکه تغییرات ارتفاع پهپاد نیز در نظر گرفته می‌شود، دوم اینکه محدودیتی برای موقعیت نشانه‌ها وجود نداشته، یعنی سیستم برپایه سنسورهای اینرسی قادر است تمام نشانه‌ها را در ارتفاعات متفاوت مشاهده کند.

تحقیق حاضر در هفت قسمت تدوین شده است به‌طوری که بعد از مقدمه در بخش دوم به بیان الگوریتم SLAM اینرسی، روابط پایه‌ی مورد نیاز برای فیلترهای کالمن و سیستم ناوبری اینرسی پرداخته شده است. در قسمت سوم مدل مشاهده و مدل سنسورهای نشانه‌ها/عارض زمینی بیان شده است. در قسمت چهارم سنسورهای range bearing و bearing only در SLAM اینرسی برای شرایط تک وسیله‌ای ارائه شده است و بخش پنجم به بیان الگوریتم ارایه شده در این مقاله پرداخته است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های صورت گرفته در بخش ششم گنجانده شده‌اند و در نهایت، بخش هفتم به ارایه نتیجه‌گیری‌ها اختصاص داده شده است.

۲- الگوریتم SLAM اینرسی

در این بخش الگوریتم SLAM اینرسی معرفی شده و عملکرد آن تجزیه و تحلیل می‌شود و همچنین تاثیر عملکرد آن روی حالت مطلوب تخمین زده شده و معادلات مدل مشاهده و فرآیند که ارتباط بین حالت تخمین زده شده و سنسورهای on-board را توصیف می‌کنند، بررسی می‌شود. قبل از هر چیز باید به این نکته توجه کرد که عملیات نقشه‌سازی و مکان‌یابی بسته به مقیاس و ابعاد محیطی که مورد کاوش قرار می‌گیرد، متفاوت بوده و دارای معادلات و شرایط مجازی است. لذا در حالت کلی دو نوع مقیاس محیطی برای SLAM در نظر گرفته می‌شود؛ الف- SLAM محلی^۱، ب- SLAM جهانی^۲. در SLAM جهانی، موقعیت پهپاد و نشانه‌های زمینی نسبت به مرکز کره‌ی زمین تخمین زده می‌شوند. اما در SLAM محلی، فقط نیاز است که موقعیت نشانه‌ها نسبت به هم در نقشه‌ی تولید شده مشخص شوند بنابراین در این حالت بایستی موقعیت پهپاد نسبت به مختصات محلی عارض زمینی معلوم باشد. در ادامه ابتدا معادلات SLAM جهانی ارائه می‌شود و بعد معادلات SLAM محلی و نیز هر جا که نیاز به تفکیک معادلات دو مقیاس نسبت به هم است، به‌طور واضح به آن اشاره شده است.

بردار حالت تخمین زده شده‌ی (k) در گام زمانی k ، شامل موقعیت سه بعدی پهپاد (p^e)، سرعت پهپاد (v^e) و زاویای اویلر ($\Psi^n = [\phi \ \theta \ \psi]^T$)، بایاس خروجی سنسورهای واحد اندازه‌گیری اینرسی (IMU)^۳ یعنی δf^b و δw_{ib}^b ، و N تا موقعیت سه بعدی نشانه‌ها در محیط (m_i^e ، می‌شود [۳۱-۳۳]:

$$\hat{x}_{global}(k) = [p^e, v^e, \Psi^n, \delta f^b, \delta w_{ib}^b, m_1^e, m_2^e, \dots, m_N^e] \quad (1)$$

به‌طوری که $N = 1, 2, \dots, i$ ، بالاًنویس e بیانگر بردارهای دستگاه مختصات ECEF^۴ است، بالاًنویس b بردارهای دستگاه مختصات بدن را نشان می‌دهد و بالاًنویس n به بردارهای دستگاه مختصات ناوبری محلی^۵ اشاره دارد. پارامترهای دستگاه مختصات بدن توسط ماتریس دوران C_b^n به پارامترهای دستگاه مختصات ناوبری محلی تبدیل می‌شوند. همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده، ارتباط مربوط بین دستگاه‌های مختصات مرجع و بردارهای یکه در الگوریتم SLAM اینرسی استفاده می‌شوند، تشریح شده است.

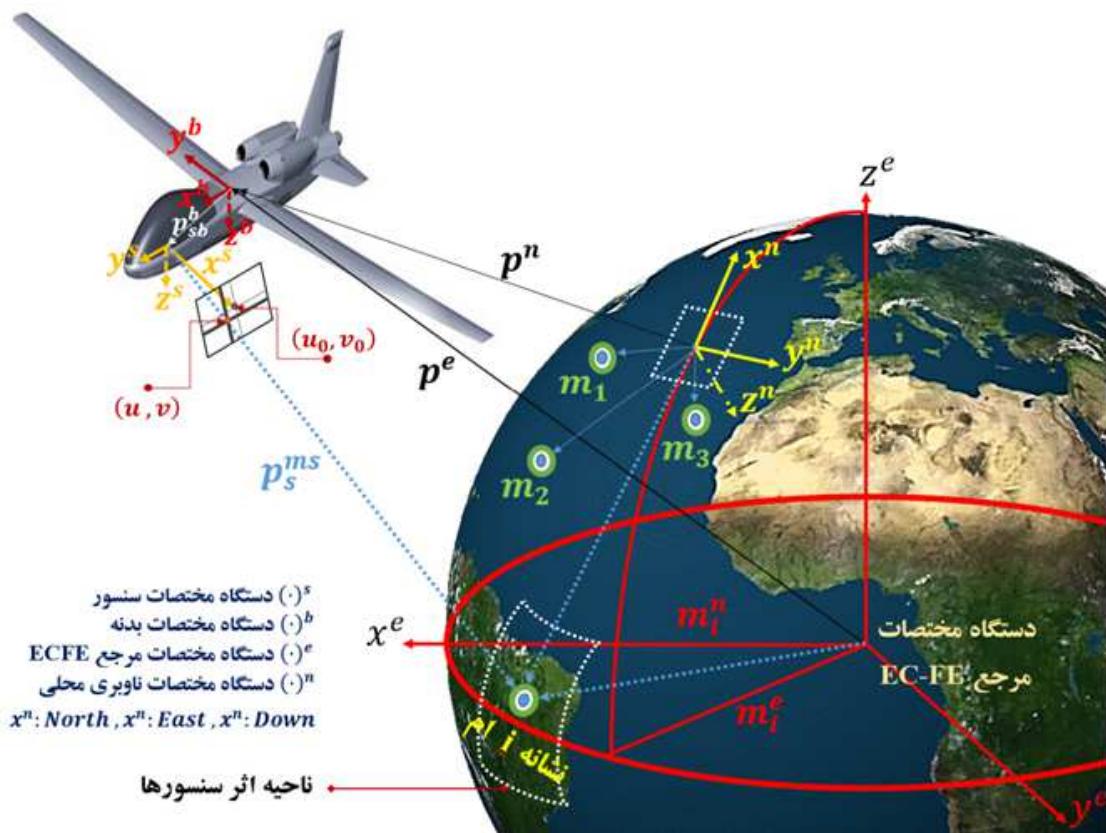
1- Local SLAM

2- Global SLAM

3- IMU: Inertial Measurement Unit

4- ECEF:Earth-Centered, Earth-Fixed

5- Local-Level Navigation Frame



شکل ۱: بردارها و دستگاه‌های مرجع در الگوریتم SLAM اینرسی.

زوایای اویلر برای نمایش وضعیت پلتفرم مورد استفاده قرار می‌گیرند تا تعداد پارامترها در تخمین گر کاهش یابد. بنابراین فرض می‌شود که زاویهی Pitch پهپاد برای جلوگیری از تکینگی زاویهی اویلر در $\theta=90^\circ$ محدود شده است. تخمین حالت ($\hat{x}_{global}(k)$) با معادله دینامیکی غیرخطی درجه‌ی اول به صورت رو به جلو در زمان با معادله زیر پیش‌بینی می‌شود.

$$\dot{\hat{x}}_{global}(t) = F_{global}[\hat{x}_{global}(t), u(t)] + G_{global}[N(t)] \quad (2)$$

بطوری کهتابع F_{global} تابع مدل فرآیند پیوسته در زمان است، تابع G_{global} تابع ورودی پیوسته در زمان است که برای وارد کردن نویز به بردار حالت سیستم استفاده می‌شود، $u(t)$ ورودی سیستم است که از داده‌های سنسورهای اینرسی تشکیل می‌شود و بردار نویز فرآیند است که از خطاهای نویز سنسورهای اینرسی تشکیل می‌شود و میانگین صفر و کوواریانس Q دارد و برداری ناهمبسته است. معادلات مدل فرآیند برای مکان، سرعت و وضعیت وسیله مبتنی بر معادلات ناوبری اینرسی با شش درجه‌ی آزادی هستند که در آن چهار چوب دستگاه مختصات اینرسی زمین اعمال می‌شود [۳۱-۳۳]:

$$\dot{p}^e = v^e \quad (3)$$

$$v^e = C_b^e f^b - C_b^e \delta f^b - C_b^e w_{accel} - 2(w_{ie}^e \times v^e) + g_l^e \quad (4)$$

$$\dot{\Psi}^n = E_b^n (\hat{w}_{ib}^b - \delta w_{ib}^b - w_{gyro} - C_n^b w_{ie}^n) \quad (5)$$

بطوری که در آن w_{ie}^e و w_{ie}^n بردارهای سرعت زاویه‌ای زمین هستند که به ترتیب در دستگاه‌های مختصات ECEF و ناوبری محلی اندازه‌گیری می‌شوند، E_b^n ماتریس تبدیل سرعت زاویه‌ای دستگاه مختصات بدنه به دستگاه مختصات ناوبری محلی بوده و g_l^e شدت میدان جاذبه‌ی محلی (گرانش محلی) است. C_b^n ماتریس دوران از دستگاه مختصات بدنه به ناوبری محلی و C_b^e ماتریس دوران از دستگاه

مختصات بدنه به ECEF هستند به طوری که می‌توانند براساس مکان معلوم دستگاه مختصات ناوبری محلی از طریق رابطه‌ی زیر محاسبه شوند:

$$C_b^e = C_n^e C_b^n \quad (6)$$

بردارهای \hat{f}^b و \hat{W}_{ib}^b به ترتیب مقدار بردار ویژه‌ی نیروی شتاب‌سنجد و مقدار سرعت زاویه‌ای ژیروسکوپ هستند (به طوری که δW_{ib}^b به ترتیب خروجی‌های شتاب‌سنجد و ژیروسکوپ هستند) و w_{accel} و w_{gyro} به ترتیب مقادیر نویز شتاب‌سنجد و ژیروسکوپ هستند که:

$$w(t) = [w_{accel}(t), w_{gyro}(t)]^T \quad (7)$$

سرعت‌های زاویه‌ای واقعی w_{ib}^b و شتاب واقعی f^b به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$f^b = \hat{f}^b - \delta f^b - w_{accel} \quad (8)$$

$$w_{ib}^b = \hat{W}_{ib}^b - \delta W_{ib}^b - w_{gyro} \quad (9)$$

کم و زیاد شدن جزئی خروجی‌های ژیروسکوپ‌ها و شتاب‌سنجهای به دلیل تغییرات دمایی و انحراف خروجی، به‌ویژه در IMU‌های کم‌هزینه، اتفاق می‌افتد. با توجه به این که معمولاً میزان این کم و زیاد شدن‌ها در مقایسه با خروجی‌های on/off سوئیچ‌های بزرگ و نسبتاً ثابت، کوچک است خروجی‌های شتاب‌سنجهای ژیروسکوپ‌ها ثابت فرض می‌شوند. مدل‌های فرآیند خروجی‌های شتاب‌سنجهای ژیروسکوپ‌ها از طریق روابط زیر حاصل می‌شوند:

$$\delta \dot{f}^b = 0 \quad (10)$$

$$\delta \dot{w}_{ib}^b = 0 \quad (11)$$

سرانجام موقعیت‌های نشانه‌های نقشه در دستگاه مختصات ECEF تخمین زده می‌شوند و همچنین به عنوان حالتی از عوارض زمینی ساکن و بی‌حرکت، ثابت فرض می‌شوند و مدل فرآیند i^{th} به صورت زیر ارایه می‌شود:

$$\dot{m}_i^e = 0 \quad (12)$$

معادلات (۳)، (۵)، (۱۰) و (۱۲) می‌توانند به صورت گسته در زمان و به شکل بازگشتی با فرض یک مرحله انتگرال‌گیری اویلری مرتبه اول، نیز بیان شوند:

$$\hat{x}_{global}(k) = F_{global}[\hat{x}_{global}(k-1), u(k), k] + G_{global}[N(k)] \quad (13)$$

به‌طوری کهتابع $F_{global}[., ., ., k]$ تابع انتقال حالت غیرخطی و $G_{global}[., ., k]$ تابع انتقال مدل ورودی در زمان k است، بنابراین مدل گسته‌ی فرآیند به صورت زیر به دست می‌آید [۳۱-۳۳]:

$$p^e(k) = p^e(k-1) + v^e \Delta t \quad (14)$$

$$v^e(k) = v^e(k-1) + [C_b^e \hat{f}^b - C_b^e \delta f^b - C_b^e w_{accel} - 2(w_{ie}^e \times v^e) + g_l^e] \Delta t \quad (15)$$

$$\Psi^n(k) = \Psi^n(k-1) + [E_b^n(\hat{W}_{ib}^b - \delta W_{ib}^b - w_{gyro} - C_n^b w_{ie}^n)] \Delta t \quad (16)$$

$$\delta f^b(k) = \delta f^b(k-1) \quad (17)$$

$$\delta w_{ib}^b(k) = \delta w_{ib}^b(k-1) \quad (18)$$

$$m_i^e(k) = m_i^e(k-1) \quad (19)$$

که Δt اختلاف زمانی بین بخش‌های گسسته k و $k-1$ است.

در اینجا معادلات بالا در مقیاس SLAM محلی ارائه می‌شوند که در آن با انتخاب دستگاه مختصات ناوبری محلی به عنوان یک دستگاه مختصات اینرسی مرجع و با صرف نظر کردن از شتاب‌های مرکزگرا^۱، اثر کوریولیس^۲ و سرعت زاویه‌ای که توسط چرخش کره‌ی زمین ایجاد می‌شود، معادلات ناوبری اینرسی به حالت‌های مدل فرآیند پهپاد ساده می‌شوند. معادلات مدل فرآیند پهپاد به شکل پیوسته در زمان در زیر آورده شده‌اند:

$$\dot{p}^n = v^n \quad (20)$$

$$\dot{v}^n = C_b^n \hat{f}^b - C_b^n \delta f^b - C_b^n w_{accel} + g^n \quad (21)$$

$$\dot{\Psi}^n = E_b^n (\hat{w}_{ib}^b - \delta w_{ib}^b - w_{gyro}) \quad (22)$$

به‌طوری که با توجه به جاذبه‌ی گرانشی در دستگاه مختصات ناوبری محلی، $g^n = [0, 0, g]^T$ بردار شتاب بوده و است. بنابراین نشانه‌های نقشه‌ی عوارض زمینی در دستگاه مختصات ناوبری محلی ارجاع داده می‌شوند و مدل فرآیند آن‌ها به صورت زیر است:

$$\dot{m}_i^n = 0 \quad (23)$$

بنابراین شکل کامل معادلات مدل فرآیند گسسته در زمان در SLAM محلی به صورت زیر هستند:

$$p^n(k) = p^n(k-1) + v^n \Delta t \quad (24)$$

$$v^n(k) = v^n(k-1) + [C_b^n \hat{f}^b - C_b^n \delta f^b - C_b^n w_{accel} + g^n] \Delta t \quad (25)$$

$$\Psi^n(k) = \Psi^n(k-1) + [E_b^n (\hat{w}_{ib}^b - \delta w_{ib}^b - w_{gyro})] \Delta t \quad (26)$$

$$\delta f^b(k) = \delta f^b(k-1) \quad (27)$$

$$\delta w_{ib}^b(k) = \delta w_{ib}^b(k-1) \quad (28)$$

$$m_i^n(k) = m_i^n(k-1) \quad (29)$$

۳- مدل مشاهده و مدل سنسورهای نشانه‌های زمینی

معادلات مدل مشاهده، ارتباط بین مشاهده‌ی سنسور از یک نشانه‌ی نقشه در دستگاه مختصات سنسور زمینی برای حالت‌های تخمین‌زده شده در SLAM را توصیف می‌کند. روابط (۳۰) و (۳۱) به ترتیب، به مشاهده‌ی $(k)_i$ حالت‌های تخمین‌زده شده SLAM جهانی و محلی مربوط می‌شوند.

$$z_i(k) = H_{i,global} (p^e(k), \Psi^n(k), m_i^e(k), k) + v(k) \quad (30)$$

$$z_i(k) = H_{i,local} (p^n(k), \Psi^n(k), m_i^n(k), k) + v(k) \quad (31)$$

به‌طوری که $v(k)$ تابع نویز توابعی از مکان نشانه‌ها، موقعیت پهپاد و زوایای اویلر هستند و $H_{i,local} (., ., ., k)$ و $H_{i,global} (., ., ., k)$ تابع نویز

1- Centripetal

2- Coriolis effect

غیرهمبسته با میانگین صفر و کواریانس R است. مشاهدات زمینی می‌توانند از انواع سنسورهای مختلف مانند رادار، یک دوربین بصری یا فاصله یاب لیزری به دست آیند. الگوریتم SLAM نیازمند این است که نشانه‌های نقطه‌ای بتوانند از داده‌های سنسوری مشاهدات استخراج شوند تا نقشه برداری نشانه‌های زمینی ادامه یابد. در شرایط داشتن اهداف بزرگی که نمی‌توانند به عنوان یک نقطه در داده‌های سنسورها در نظر گرفته شوند، مرکز جرم هدف پیدا می‌شود یا چندین نقطه‌ی دیگر می‌توانند برای نمایش فقط یک هدف، استفاده شوند. مشاهده‌ی سنسوری می‌تواند به دو نوع تفکیک شود؛ الف: مشاهدات range bearing و ب: مشاهدات bearing only هنگامی که هر دو نوع مشاهدات حاصل می‌شوند مدل مشاهده به صورت زیر خواهد بود [۳۴-۳۶]:

$$\begin{bmatrix} \rho_i \\ \varphi_i \\ \vartheta_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{(x_i^s)^2 + (y_i^s)^2 + (z_i^s)^2} \\ \tan^{-1}\left(\frac{y_i^s}{x_i^s}\right) \\ \tan^{-1}\left(\frac{z_i^s}{\sqrt{(x_i^s)^2 + (y_i^s)^2}}\right) \end{bmatrix} \quad (32)$$

به طوری که ρ_i ، φ_i و ϑ_i زاویه‌های اوپلر مشاهده شده نسبت به نشانه‌ها بوده و x_i^s ، y_i^s و z_i^s مختصات کارتزین $p_{ms,i}^s$ هستند که موقعیت نسبی نشانه نام نسبت به سنسور می‌باشد و در دستگاه مختصات سنسور اندازه‌گیری می‌شود. برای نشان دادن یک مشاهده‌ی bearing only، دو قالب وجود دارد که می‌توان از آنها استفاده کرد. مشاهده‌ی (k) z_i می‌تواند به وسیله‌ی زاویه‌های زاویه‌های bearing only $elevation(\vartheta_i)$ و $azimuth(\varphi_i)$ نمایش داده شود:

$$\begin{bmatrix} \varphi_i \\ \vartheta_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tan^{-1}\left(\frac{y_i^s}{x_i^s}\right) \\ \tan^{-1}\left(\frac{z_i^s}{\sqrt{(x_i^s)^2 + (y_i^s)^2}}\right) \end{bmatrix} \quad (33)$$

به طوریکه R_{ang} کواریانس نویز زاویه‌ای است. برای دوربین بصری، مشاهده به صورت مطلوب‌تری به شکل پیکسل‌هایی در تصویر دوربین نمایش داده می‌شود:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_u \left(\frac{y_i^s}{x_i^s} \right) + u_0 \\ f_v \left(\frac{z_i^s}{x_i^s} \right) + v_0 \end{bmatrix} \quad (34)$$

جایی که f_u ، f_v ، u_0 ، v_0 پارامترهای کالیبراسیون برای دوربین هستند و R_{pix} کواریانس نویز پیکسل است. ارتباط بین مختصات پیکسل و زاویه‌های $elevation$ و $azimuth$ با رابطه‌ی (۳۵) داده شده است:

$$\begin{bmatrix} \varphi \\ \vartheta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tan^{-1} \frac{(u - u_0)}{f_u} \\ \tan^{-1} \left(\frac{(v - v_0)}{f_v} \cos \varphi \right) \end{bmatrix} \quad (35)$$

موقعیت نسبی نشانه نام نسبت به سنسور یعنی $p_{ms,i}^s$ که در دستگاه مختصات سنسور اندازه‌گیری می‌شود، به صورت رابطه‌ی زیر داده می‌شود:

$$p_{ms,i}^s = C_b^s C_n^b \left[m_i^n - p^n - C_b^n p_{sb}^b \right] = C_b^s C_e^b \left[m_i^e - p^e - C_b^e p_{sb}^b \right] \quad (36)$$

که در آن C_b^s ماتریس دوران از دستگاه مختصات بدن به دستگاه مختصات سنسور است، p_{sb}^b آفست (انحراف) سنسور از مرکز جرم وسیله است که در دستگاه مختصات بدن اندازه‌گیری می‌شود و $C_e^b = (C_b^e)^T$ است.

۴- سنسورهای SLAM و range bearing only

هنگامی که مشاهدات هر دو سنسور مذکور موجود باشند، الگوریتم SLAM اینرسی چهار مرحله را انجام می‌دهد [۳۷].

- .I مرحله‌ی پیش‌بینی که در آن معادلات مدل فرآیند به صورت روبه جلو در زمان برای پیش‌بینی کردن بردار حالت تخمین زده شده و ماتریس کوواریانس حالت در یک گام پیش‌بینی EKF محاسبه می‌شود.
- .II وابسته‌سازی داده‌ها برای شناسایی جدید بودن نشانه‌های مشاهده شده.
- .III مقداردهی اولیه‌ی یک نشانه، به طوری که موقعیت نشانه‌ی جدید، محاسبه شده و به بردار حالت تخمین زده اضافه شده و عدم قطعیت موقعیت اولیه آن به ماتریس کوواریانس حالت اضافه می‌شود.
- .IV به روز رسانی حالت که در آن بهازای هر مشاهده یک گام بهروز رسانی در EKF برای اصلاح مقدار حالت تخمین زده شده و به روز رسانی ماتریس کوواریانس حالت، انجام می‌گیرد.

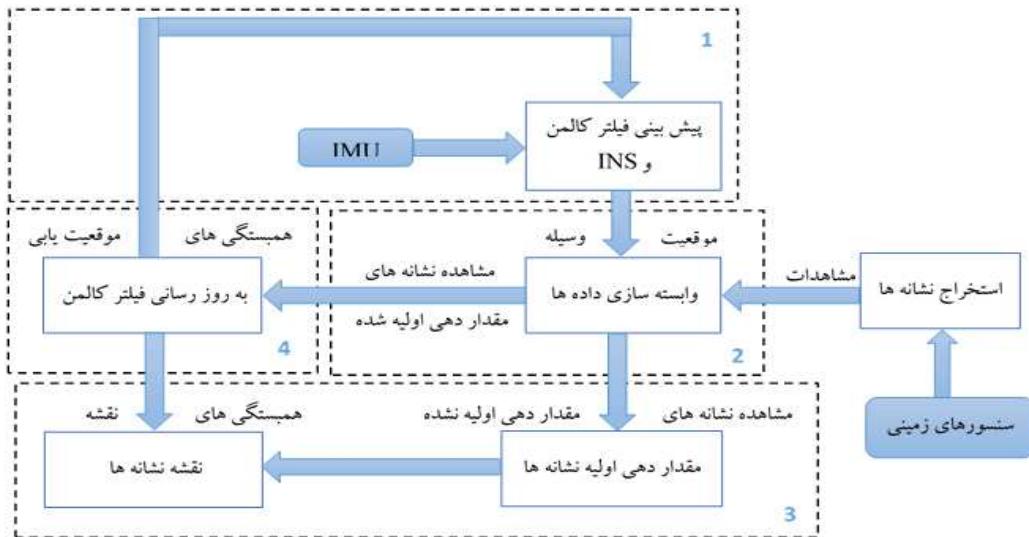
شکل ۲ مرور اجمالی بر الگوریتم SLAM اینرسی range/ bearing اینرسی است. همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود الگوریتم بازگشتی است، پیش‌بینی حالت EKF یعنی بلوک ۱ هنگامی که داده‌ی سنسور اینرسی آمده و در دسترس باشد، اجرا می‌شود. بخش وابسته‌سازی داده یعنی بلوک ۲، بخش مقداردهی اولیه‌ی نشانه یا بلوک ۳ و بخش بهروز رسانی حالت EKF یا بلوک ۴ هنگامی که مشاهدات سنسورهای زمینی صورت می‌گیرد، اجرا می‌شوند.

۴-۱- پیش‌بینی حالت

هر لحظه که یک مقدار جدیدی از سنسورهای اینرسی گرفته می‌شود مرحله‌ی پیش‌بینی حالت به طور بازگشتی اجرا می‌شود. در SLAM جهانی، بردار حالت تخمین زده شده یعنی $(k+1) \hat{x}_{global}$ از تخمین حالت گام زمانی قبلی با استفاده از روابط (۱۴) تا (۱۹) پیش‌بینی می‌شود. ماتریس کوواریانس حالت در گام زمانی k بعد از پیش‌بینی، یعنی $(k+1) p^-$ مانند رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$p^-(k+1) = \nabla F_{global} p(k) \nabla F_{global}^T + \nabla G_{global} Q(k) \nabla G_{global}^T \quad (37)$$

که در آن ∇F_{global} و ∇G_{global} به ترتیب ژاکوین‌هایتابع انتقال حالت $(k+1), \dots, k$ نسبت به بردار حالت $(k+1) \hat{x}_{global}$ و تابع انتقال مدل ورودی $(k+1), \dots, k$ نسبت به ورودی نویز $N(k+1)$ هستند.



شكل ٢: مرور اجمالی بر الگوریتم SLAM اینرسی range/ bearing

در SLAM محلی، بردار حالت تخمین زده شده یعنی $\hat{x}_{local}^{(k+1)}$ با استفاده از روابط (۲۴) تا (۲۹) به صورت رو به جلو پیش‌بینی می‌شود.

$$p^-(k+1) = \nabla F_{local} p(k) \nabla F_{local}^T + \nabla G_{local} Q(k) \nabla G_{local}^T \quad (\text{4A})$$

جای که ∇F_{local} و ∇G_{local} به ترتیب ژاکوین هایتابع انتقال حالت $(k+1,..,k)$ نسبت به بردار حالت $\hat{x}_{local}(k+1)$ وتابع انتقال مدل ورودی $G_{local}(k,..,k)$ نسبت به ورودی نویز $w(k+1)$ هستند.

۴-۲- مقداردهی اولیه‌ی نشانه

هنگامی که اولین مشاهده‌ی range/bearing از یک نشانه‌ی خاص به دست می‌آید، موقعیت آن نشانه با استفاده ازتابع مقداره‌ی اولیه $J_1 \left[\hat{x}(k), J_2 \left(z_i(k) \right) \right]$ به صورت رابطه‌ی (۳۹) برای SLAM جهانی و رابطه‌ی (۴۰) برای SLAM محلی، محاسبه می‌گردد:

$$J_{1,global} \left[\hat{x}_{global}(k), J_2(z_i(k)) \right] \rightarrow m_i^e = p^e + C_n^e C_b^n p_{sb}^b + C_n^e C_b^n C_s^b p_{ms}^s \quad (\text{¶}\text{¶})$$

$$J_{1,local} \left[\hat{x}(k)_{local}, J_2(z_i(k)) \right] \rightarrow m_i^n = p^n + C_b^n p_{sb}^b + C_b^n C_s^b p_{ms}^s \quad (\text{Eq. 1})$$

به طوری که برای هر دوی SLAM جهانی و SLAM محلی، $J_2(z_i(k))$ به صورت زیر است:

$$J_2(z_i(k)) \rightarrow p_{ms,i}^s = \begin{bmatrix} \rho_i \cos(\phi_i) \cos(\vartheta_i) \\ \rho_i \sin(\phi_i) \cos(\vartheta_i) \\ \rho_i \sin(\vartheta_i) \end{bmatrix} \quad (\text{F1})$$

سپس بردار حالت و ماتریس کوواریانس حالت با اضافه شدن موقعیت نشانه‌ی جدید تکمیل می‌شوند:

$$\hat{x}_{global,aug}(k) = \begin{bmatrix} \hat{x}_{global}(k) \\ m_i^e(k) \end{bmatrix} \quad (\text{Eq. 2})$$

$$p_{global,aug}(k) = \begin{bmatrix} I & 0 \\ \nabla J_u & \nabla J_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_{global}(k) & 0 \\ 0 & R_u \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I & 0 \\ \nabla J_u & \nabla J_z \end{bmatrix}^T \quad (43)$$

روابط (۴۱) و (۴۲) برای SLAM جهانی بوده و برای SLAM محلی این معادلات به صورت زیر هستند:

$$\hat{x}_{local,aug}(k) = \begin{bmatrix} \hat{x}_{local}(k) \\ m_i^e(k) \end{bmatrix} \quad (44)$$

$$P_{local,aug}(k) = \begin{bmatrix} I & 0 \\ \nabla J_x & \nabla J_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_{local}(k) & 0 \\ 0 & R_x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I & 0 \\ \nabla J_x & \nabla J_z \end{bmatrix}^T \quad (45)$$

به طوری که ∇J_x و ∇J_z به ترتیب ژاکوبین‌هایتابع مقداردهی اولیه J_1 نسبت به تخمین حالت $\hat{x}(k)$ و مشاهده $(k)_i z$ هستند.

۴-۳-وابسته‌سازی داده

وابسته‌سازی داده، فرآیند تطبیق مشاهدات صورت گرفته توسط سنسورهای زمینی از نشانه‌ها با موقعیت‌های سه بعدی تخمین زده شده‌ی نشانه‌های درون نقشه است. اعتبار وابسته‌سازی‌های بالقوه بین مشاهدات و نشانه‌ها با استفاده از معیار فاصله‌ی Mahalanobis [۳۸] (γ) در فضای سنسور ارزیابی می‌شود:

$$\gamma_i = v_i^T(k) S_i^{-1}(k) v_i(k) \quad (46)$$

به طوری که $v_i(k)$ و $S_i(k)$ نوآوری^۱ و کوواریانس نوآوری برای یک مشاهده از نشانه θ ام در نقشه در بخش زمانی k هستند. هنگام بررسی کردن وابسته‌سازی یک مشاهده‌ی داده شده با نشانه‌های مقداردهی اولیه شده در نقشه، i برای هر نشانه مقداردهی اولیه شده محاسبه می‌شود. تطابق‌هایی که در درون یک آستانه‌ی تعریف شده از γ مطابق با سطح ۹۵٪ از اطمینان قرار می‌گیرند، قابل قبول در نظر گرفته می‌شوند، که در این صورت مشاهده با یک نشانه‌ی مشخص شده در نقشه وابسته‌سازی می‌شود و یک گام به روز رسانی حالت EKF اجرا می‌شود. اگر مشاهده در داخل آستانه‌ی یک نشانه موجود در نقشه‌ی قرار نگیرد این گونه فرض می‌شود که نشانه قبل‌آیده نشده است و بنابراین داده‌ی مشاهده‌ای برای مقداردهی اولیه نشانه درون نقشه استفاده می‌شود.

هنگامی که مشاهدات نشانه‌ها به خوبی در مختصات سنسور نسبت به عدم قطعیت جهت‌گیری و موقعیت وسیله، قرار داده می‌شوند، این روش وابسته‌سازی داده به خوبی کار می‌کند. در شرایطی که نشانه‌ها خیلی متراکم هستند، نه تنها ممکن است در نظر گرفتن مطابقت‌های نشانه‌های منحصر به فرد با مشاهدات سنسورهای منحصر به فرد لازم باشد بلکه امکان دارد در نظر گرفتن سازگاری مشترک چندین نشانه با چندین مشاهده به طور همزمان نیز لازم باشد تا بر ابهامات وابسته‌سازی غلبه شود.

۴-۴-به روز رسانی بردار حالت

پس از این که یک نشانه در بردار حالت، مقداردهی اولیه شد، مشاهدات بعدی صورت گرفته از این نشانه برای به روز رسانی همه‌ی عناصر بردار حالت که شامل موقعیت و سرعت پهپاد، خروجی‌های سنسورهای اینرسی و موقعیت نشانه مذکور و سایر نشانه‌های محیط می‌شود، استفاده می‌گردد. تخمین حالت در مرحله‌ی به روز رسانی EKF، به روز می‌شود. به طوری که تخمین حالت و ماتریس کوواریانس حالت بعد از به روز رسانی برای SLAM جهانی به صورت زیر می‌باشد [۳۰]:

$$\hat{x}_{global}^+(k+1) = \hat{x}_{global}^-(k+1) + N(k+1)v(k+1) \quad (47)$$

$$\hat{p}_{global}^+(k+1) = \hat{p}_{global}^-(k+1) - N(k+1)S_i(k+1)N(k+1)^T \quad (48)$$

$$v_i(k+1) = z_i - H_{i,global}(\hat{x}_{global}^-(k+1)) \quad (49)$$

$$S_i(k+1) = \nabla H_{i,global} \hat{p}_{global}^-(k+1) \nabla H_{i,global}^- + R(k+1) \quad (50)$$

$$N(k+1) = \hat{p}_{global}^-(k+1) \nabla H_{i,global}^T S_i^{-1}(k+1) \quad (51)$$

جایی که $H_{i,global}$ مشاهده‌ی نشانه‌ی پیش‌بینی شده است که از موقعیت و وضعیت تخمین زده شده‌ی پهپاد و مکان نقشه‌ی تخمین زده شده با استفاده از معادلات (۳۱) و (۳۵) محاسبه می‌شود.تابع $\nabla H_{i,global}$ ژاکوبین تابع مشاهده نسبت به بردار حالت پیش‌بینی شده است. برای SLAM محلی نیز با تغییر پارامترهای SLAM جهانی به پارامترهای SLAM محلی روابط (۴۶) تا (۵۰) برقرار می‌باشد.

۵- الگوریتم SLAM اینرسی ارایه شده در این مقاله و پیاده‌سازی شده در شبیه‌سازی‌ها

الگوریتم ارایه شده برای هر دو شرایط استفاده از سنسورهای range/bearing only به کار می‌رود. مراحل این الگوریتم در زیر به تفصیل بیان شده است.

I. در اولین گام و با در نظر گرفتن مقادیر اولیه، حالت بعدی برای بردار حالت و ماتریس کواریانس پیش‌بینی می‌شود. پیش‌بینی حالت‌ها با کمک حالت‌های قبل و مشتق بردار حالت قبل و ماتریس‌های ژاکوبین G^F و به خصوص با کمک داده‌های دریافتی از شتاب‌سنج و ژیروسکوپ، صورت می‌گیرد.

II. در مرحله بعد که سنسور زمینی مشاهده‌ای را ارائه می‌دهد، سیستم به وابسته‌سازی داده‌ها می‌پردازد. یعنی باید تشخیص داده شود که این نشانه قبلاً مشاهده شده است یا نه؟

III. اگر نشانه‌ی مشاهده شده، یک نشانه‌ی جدید باشد در آن صورت مکان تقریبی آن در مختصات پهپاد و در مختصات مرجع (جهانی یا محلی) محاسبه شده و به نقشه ایجاد شده، اضافه می‌شود.

IV. اگر تشخیص داده شود که نشانه‌ی مشاهده شده، قبلاً رویت شده است، در آن صورت سیستم با درنظر گرفتن هر دو مشاهده‌ی جدید و قدیم برای آن نشانه، سعی به بهبود مکان تخمین زده شده برای آن نشانه می‌کند.

V. در آخرین گام از اولین حلقه، الگوریتم، بردار حالت و ماتریس کواریانس را به روز می‌کند. یعنی بر اساس مشاهدات صورت گرفته، ماتریس کواریانس و بردار حالت متšکل از موقعیت، سرعت، زوایای اویلر و مقادیر شتاب و چرخش تخمین زده شده به روز می‌شوند. در واقع یک بردار نوآوری براساس مشاهدات، ایجاد کرده و با استفاده از روابط ارائه شده، به روز رسانی صورت می‌گیرد.

VI. الگوریتم دوباره به مرحله‌ی اول بازگشته و این حلقه را تا پایان مسیر تکرار می‌شود (در شبیه‌سازی ۱۰۰ ثانیه پرواز، این حلقه ۱۰۰۰ بار تکرار می‌شود یعنی گام مشاهدات ۱/۰۱ ثانیه در نظر گرفته شده است).

در شکل ۳ شماتیکی از این الگوریتم آورده شده است.

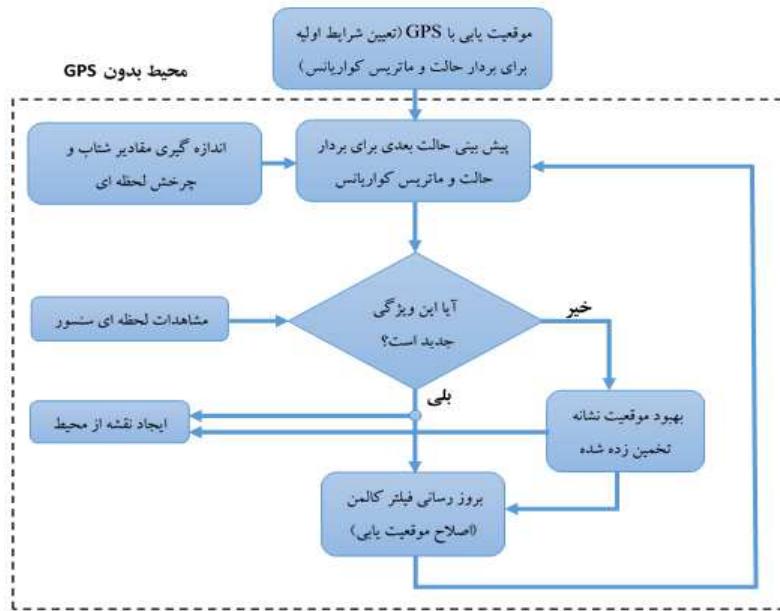
۶- نتایج شبیه‌سازی‌ها

قبل از پیاده‌سازی الگوریتم SLAM، باید یک سری پیش‌نیازها از جمله شرایط اولیه، موقعیت واقعی نشانه‌ها مشخص شوند.

۶-۱- اندازه‌گیری مقادیر شتاب و چرخش و شرایط اولیه

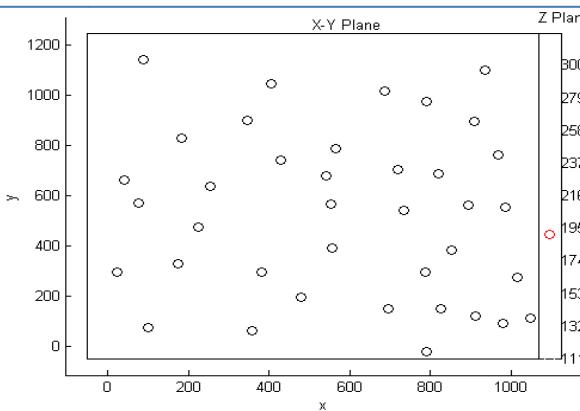
همان‌طور که قبلاً اشاره شد در الگوریتم SLAM اینرسی برای پهپاد، مقادیر لحظه‌ای شتاب و چرخش بدنه به عبارت دیگر خروجی‌های واحد IMU، مورد نیاز است که در عمل این مقادیر به کمک شتاب‌سنج‌ها و ژیروسکوپ‌ها به صورت آنی اندازه‌گیری می‌شوند ($\hat{f}^b(t)$ ، $\hat{w}_{lb}^b(t)$). بهمنظور شبیه‌سازی، یک پایگاه داده از این مقادیر برای مسیر پرواز به مدت ۱۰۰ ثانیه تهیه شد و در هر لحظه با

مراجعه به این پایگاه داده‌های عملی که مشابه با اندازه‌گیری در دنیای واقعی است، می‌توان به خروجی‌های شتاب‌سنج‌ها و ژیروسکوپ‌ها



شکل ۳: شماتیکی از الگوریتم ارایه شده در این مقاله.

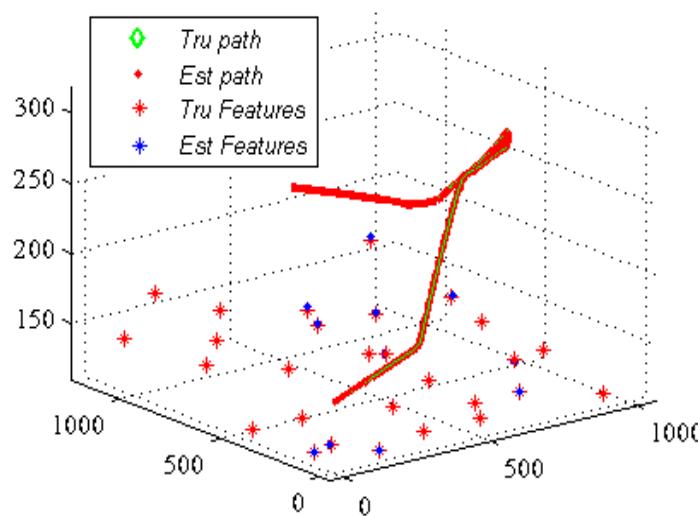
دسترسی پیدا کرد. برای آن که الگوریتم SLAM اینرسی به خوبی قادر به تخمین مکان پهپاد باشد، اطلاع از مکان اولیه پهپاد، تأثیر بسزایی در عملکرد صحیح الگوریتم دارد. به همین منظور در ابتدا با شروع شبیه‌سازی برای چند ثانیه فرض بر آن است که سیستم GPS فعال باشد و سیستم به کمک آن مکان‌یابی را انجام دهد و موقعیت اولیه خود را تخمین بزند. بعد از گذشت این چند ثانیه دیگر سیگنال GPS در دسترس نبوده و الگوریتم با در اختیار داشتن مقادیر اولیه، برای بردار حالت و ماتریس کواریانس شروع به کار می‌کند. در واقع علاوه بر شبیه‌سازی الگوریتم SLAM اینرسی پیشنهادی، برای تعیین صحیح شرایط اولیه، از داده‌های GPS استفاده کرده است که این کار به علت انتقال داده‌های GPS به الگوریتم SLAM و بازخوانی داده‌های GPS توسط الگوریتم فیلتر کالمن توسعه یافته، باعث سختی دوچندان کار و صرف زمان بیشتر می‌شود. افزایش زمان ناشی از این است که الگوریتم با شروع فرآیند، GPS را برای بدست آوردن مقادیر اولیه بررسی می‌نماید و تا زمانی که مقادیر اولیه را بدست نیاورده باشد این فرایند تکرار می‌شود و بعد از تعیین مقادیر اولیه، GPS از چرخه خارج می‌شود. هرچند که می‌توانستیم شرایط اولیه را به شکل دستی وارد کنیم اما برای آن که سیستم کاملاً با واقعیت تطابق داشته باشد و امکان پیاده‌سازی عملی مهیا باشد، این قابلیت به الگوریتم اضافه شد. در اجرای برنامه این امکان فراهم شده است که نقاط نشانه‌ها به شکل دلخواه و با ارتفاع‌های متفاوت تعریف شوند که با این کار موقعیت واقعی نقاط نشانه‌ها به نقشه اضافه می‌شوند (شکل ۴) و همان‌طور که مشاهده می‌شود موقعیت‌ها را می‌توان به دلخواه در راستای محورهای X و Y و نیز با تغییر مکان دایره قرمز رنگ در راستای Z انتخاب کرد.



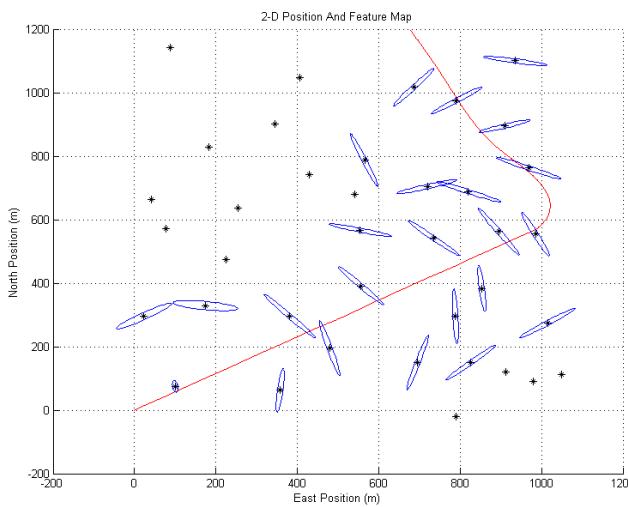
شکل ۴: تعریف موقعیت واقعی نشانه ها با ارتفاع های متفاوت، به طوری که ابتدا با تغییر موقعیت دایره قرمز رنگ در نوار عمودی سمت راست شکل، ارتفاع موقعیت نشانه را مشخص می کنیم و بعد با اضافه کردن دایره سیاه در صفحه سمت چپ شکل موقعیت X و Y نقطه مورد نظر را تعیین می کنیم.

۲-۶- نتایج

در این بخش ترسیم نقشه‌ی انجام گرفته برای مکان‌های تخمین زده شده نشانه‌ها و تخمین مسیر حرکت (شامل حرکت انتقالی و چرخشی) پهپاد به همراه تخمین سرعت‌های آن نشان داده است که در همه‌ی آن‌ها موارد تخمین زده شده با مقادیر واقعی مقایسه شده‌اند تا بدین صورت عملکرد سیستم شبیه‌سازی شده مشخص گردد. با شروع فرآیند، نشانه‌ها به کمک سنسورهای پهپاد مشاهده می‌شوند (مکان‌های تخمین زده شده برای نشانه‌ها). سنسوری که برای این سیستم در نظر گرفته می‌شود به صورت یک فاصله سنج با محدوده ۳۰۰ متر تعریف شده است. یعنی این سنسور که بر بدن هواپیما سوار است، تا شعاع کروی به اندازه ۳۰۰ متر قادر به دریافت اطلاعات از مکان نسبی نقاط نشانه‌ها می‌باشد. شکل ۵ نمای سه بعدی مسیر حرکت پهپاد به همراه نشانه‌های تخمین زده شده را نشان می‌دهد. در این شکل هم مسیر واقعی حرکت پهپاد و هم مسیر تخمین زده ترسیم شده است. به طوری که مشاهده می‌گردد الگوریتم به خوبی مسیر پهپاد را تخمین زده است. همچنین در این شکل موقعیت واقعی نشانه‌ها و موقعیت تخمین زده شده آن‌ها نیز نشان داده شده است.



شکل ۵: نمای سه بعدی از نقشه ترسیمی توسط الگوریتم SLAM اینرسی.



شکل ۶: نمای دو بعدی از محدوده مکان نشانه های تخمین زده شده و همچنین مسیر حرکت تخمین زده شده پهپاد توسط الگوریتم.

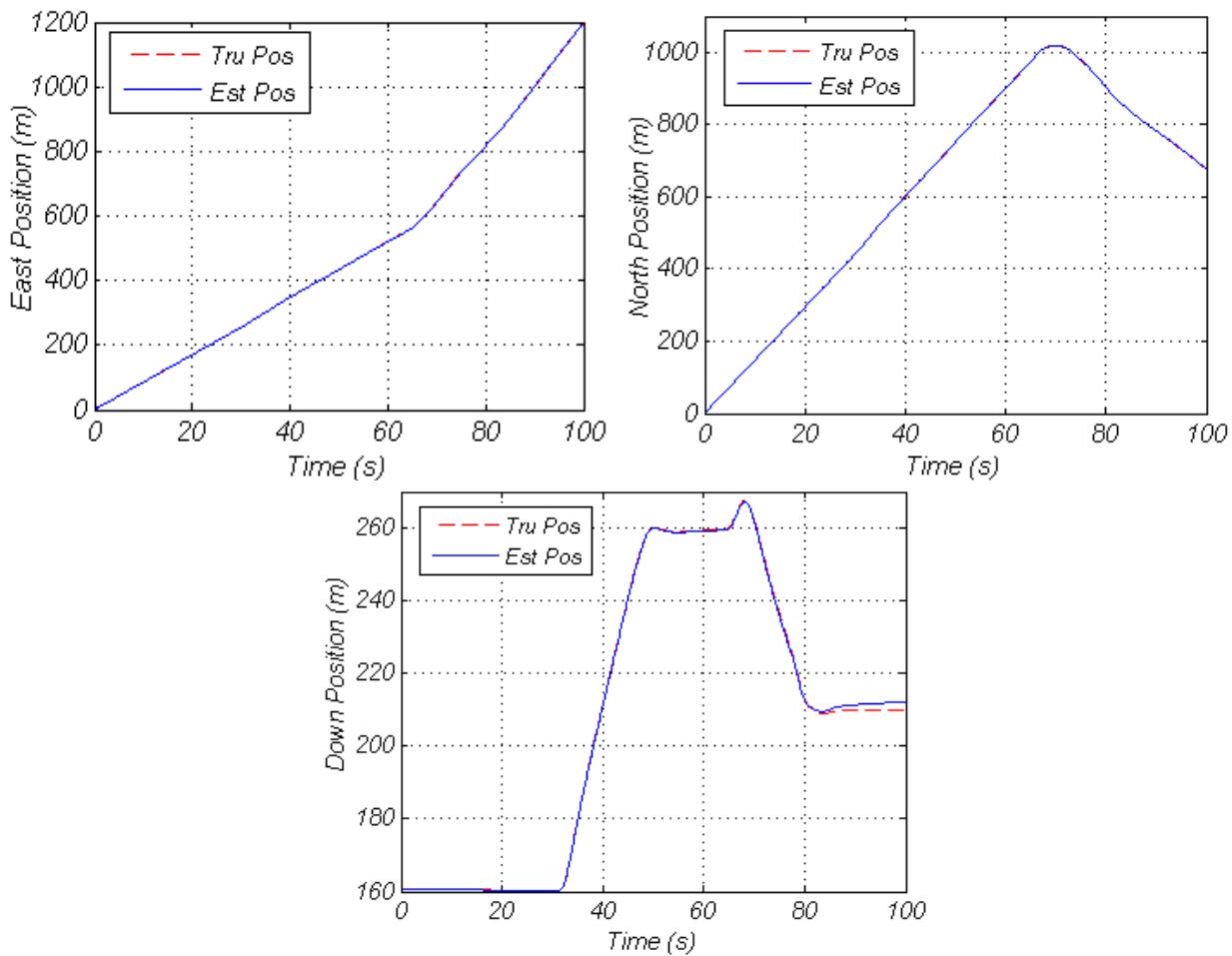
در شکل ۶ محدوده موقعیت نشانه های تخمین زده شده و همچنین مسیر حرکت تخمین زده شده توسط الگوریتم SLAM اینرسی نشان داده شده است. در واقع آنچه که سیستم با روش SLAM فراهم می‌آورد، در این نمای دو بعدی نشان داده می‌شود. خط قرمز رنگ مسیر حرکت تخمین زده شده را نشان می‌دهد. نقاط سیاه رنگ همان نشانه های حقیقی تعریف شده می‌باشد و شکل های بیضی مانند، در واقع محدوده ای را نشان می‌دهند که توسط الگوریتم به عنوان نشانه مشاهده شده اند که این محدوده ها توسط ماتریس کوواریانس برای هر نقطه نشانه تعیین شده اند.

در حقیقت این شکل توصیفی بر مکان یابی و نقشه سازی همزمان می‌باشد که همان SLAM نامیده می‌شود و در این کار از آن به عنوان الگوریتم SLAM اینرسی یاد می‌شود. این شکل به خوبی کارایی مناسب سیستم طراحی شده را به اثبات می‌رساند. علاوه بر این که سیستم به درستی مکان پهپاد را تخمین زده، در زمینه نقشه سازی از محیط نیز به خوبی عمل نموده است و کلیه نشانه هایی که در محدوده ای عملکرد سنسور قرار داشته اند را به خوبی تشخیص داده است.

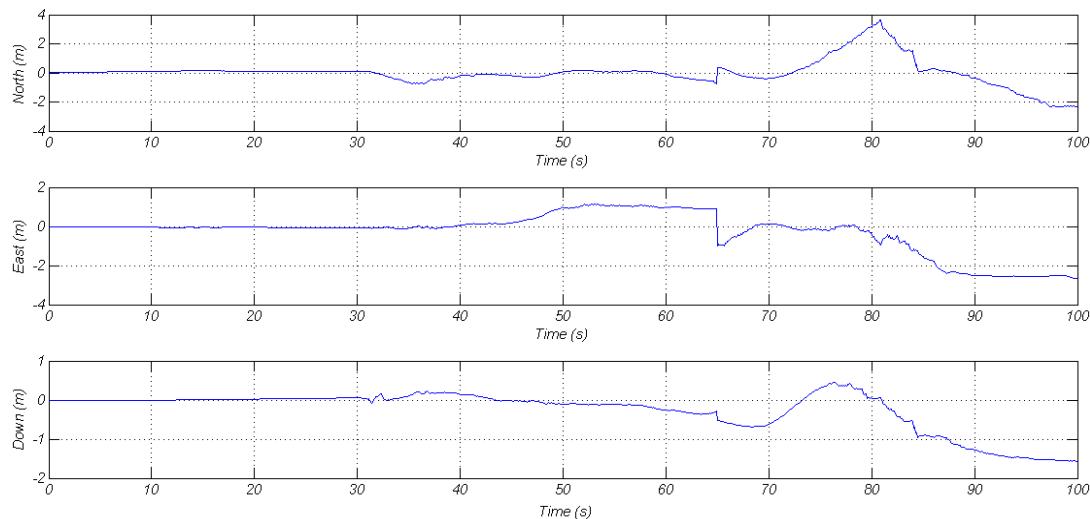
در منحنی های شکل ۷ برای بهتر مشخص شدن عملکرد مطلوب سیستم طراحی شده برای تعیین موقعیت پهپاد، مکان تخمینی توسط الگوریتم با مکان واقعی پهپاد مقایسه شده است و میزان خطای آنها در شکل ۸ نشان داده شده اند. همان‌طور که از شکل های مذکور مشخص است خطای مقدار ناچیزی است و بیشتر در تغییر جهت های مسیر هواییما (ثانیه ۶۵) مشاهده می‌شود و البته چنانچه مسیر به حالت عادی برگرد خطا نیز به صفر میل خواهد کرد و این تأییدی بر قدرت بالای سیستم طراحی شده را برای تعیین موقعیت پهپاد با کمک الگوریتم است. در شکل ۹ اندازه هی سرعت پهپاد در دو حالت واقعی و تخمین زده شده نشان شده است و در شکل ۱۰ سرعت در هر یک از راستها مقایسه شده است. اندازه سرعت با رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$v_{mag} = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2} \quad (52)$$

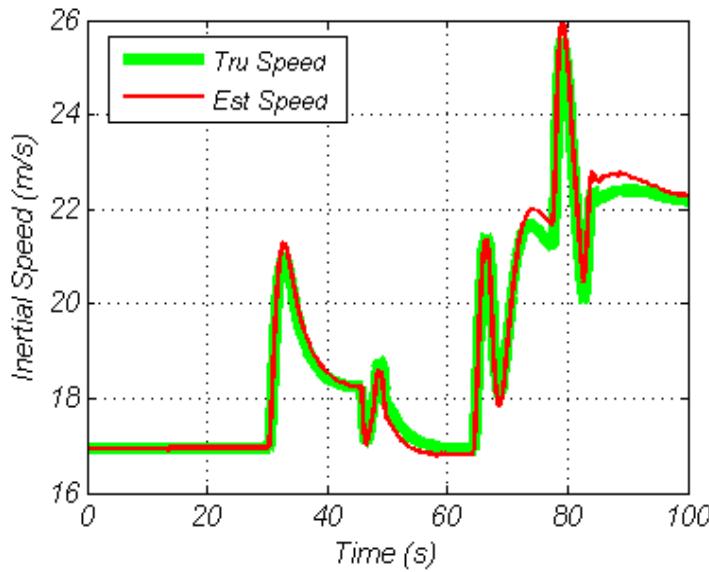
در شکل ۱۱ هم زوایای اویلر واقعی و تخمین زده مقایسه شده اند و میزان خطای ناچیز مشاهده شده اثباتی بر قدرت بالای الگوریتم می‌باشد.



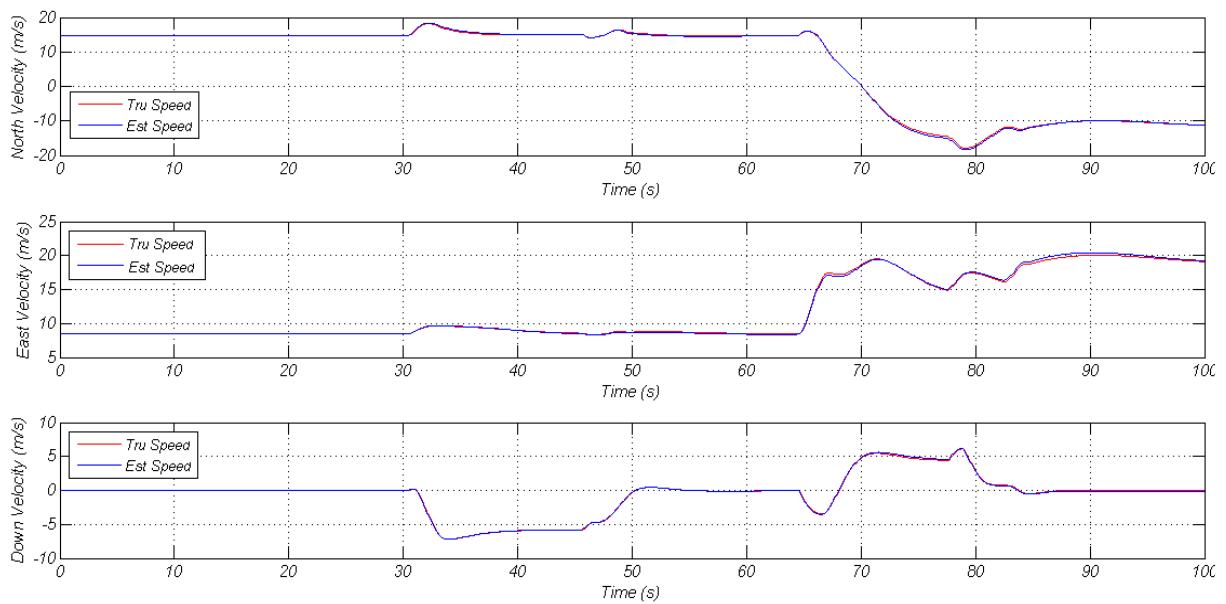
شکل ۷: مقایسه مکان واقعی پهپاد با مکان تخمین زده شده توسط الگوریتم برای حرکت در راستاهای شرق، شمال و راستای پائین.



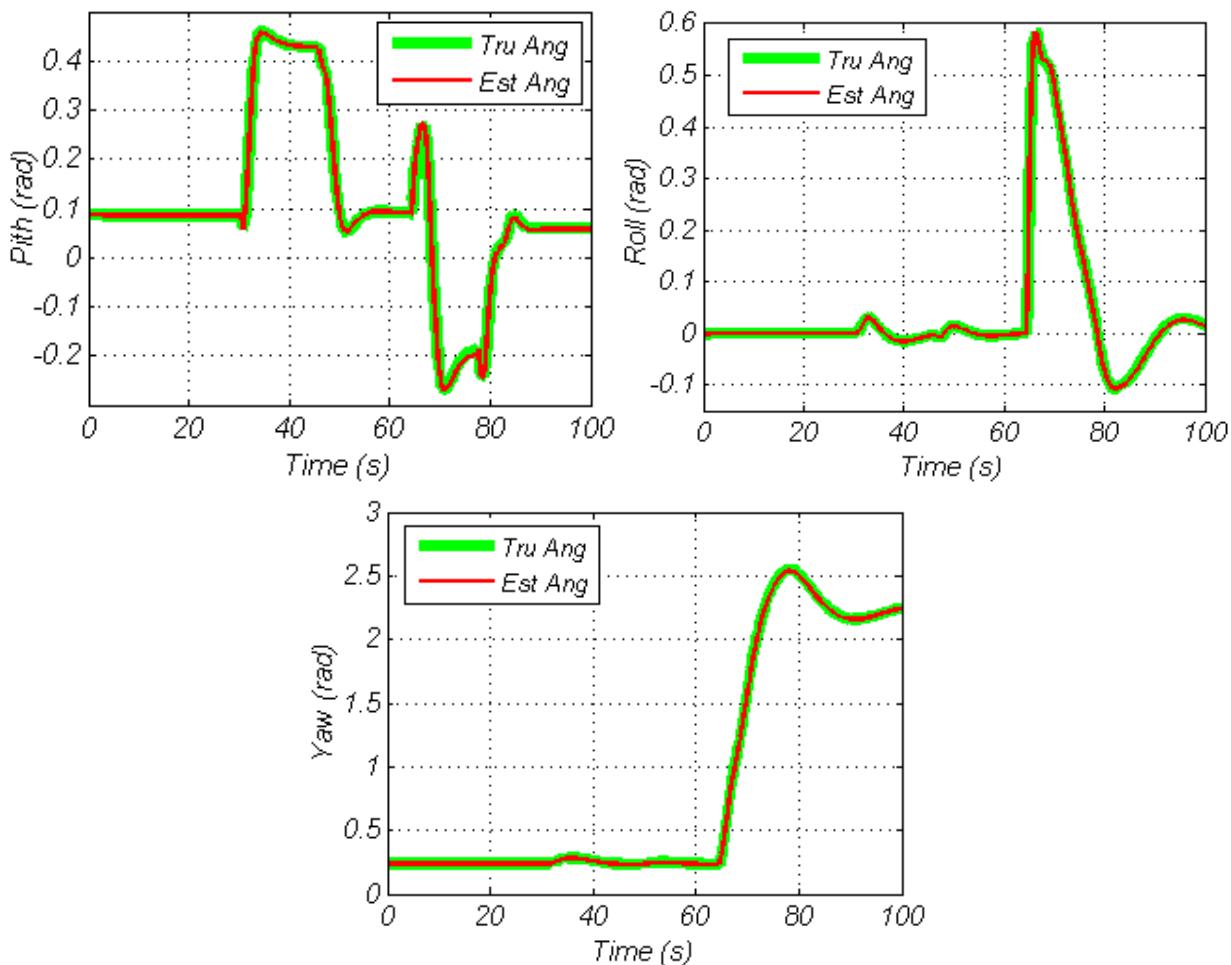
شکل ۸: منحنی های خطاهای بین موقعیت واقعی پهپاد و موقعیت تخمین زده شده توسط الگوریتم.



شکل ۹: مقایسه اندازه سرعت واقعی پهپاد با مقدار تخمین زده شده توسط الگوریتم.



شکل ۱۰: مقایسه سرعت‌های واقعی پهپاد با مقدار تخمین زده شده توسط الگوریتم؛ در راستاهای شرق، شمال و راستای پایین.



شکل ۱۱: مقایسه زوایای واقعی پهپاد با مقادیر تخمین زده شده توسط الگوریتم؛ زوایای Pitch، Roll و Yaw.

۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله کلیه روش‌ها و معادلات پایه برای پیاده سازی SLAM اینرسی مبتنی بر سنسورهای اینرسی بر روی یک پهپاد، بسط و توسعه داده شد. معادلات بنیادی که سنسورهای اینرسی و ناویری اینرسی را مدل‌سازی می‌کنند، تجزیه و تحلیل شدند؛ دو کاربرد متفاوت برای زمانی که مکان‌یابی و نقشه‌سازی در یک چهارچوب جهانی از دستگاه مختصات مرجع یا در یک چهارچوب محلی اختیاری از دستگاه مختصات مرجع صورت می‌گیرد، تحلیل شدند. الگوریتم SLAM ارایه شده برای شرایطی که مشاهدات بر پایه‌ی سنسورهای range/bearing صورت می‌گیرند، بررسی شد. نتایج شبیه‌سازی‌ها گواه بر کارآبی مطلوب سیستم طراحی شده دارند. الگوریتم طراحی شده هم در زمینه‌ی تعیین موقعیت پهپاد و هم در زمینه‌ی نقشه‌سازی از نشانه‌های زمینی با خطای کم، کارآبی قابل قبولی را ارایه کرده است.

در این پژوهش، الگوریتم ارایه شده در شرایط سه بعدی بر روی یک پهپاد با تمام درجات آزادی (شش درجه آزادی) پیاده شده و کلیه روابط مورد نیاز را استخراج و تحلیل شد. نکته قابل توجه در سیستم پیشنهادی، عدم محدودیت در ارتفاع نشانه‌های زمینی است. در کلیه کارهای قبلی که در زمینه SLAM برای پهپاد صورت گرفته، همواره از این فرض استفاده شده که کلیه نشانه‌ها در ارتفاع پایین‌تری از پهپاد قرار دارند و به نوعی درجه آزادی مربوط به تغییرات ارتفاع پرواز پهپاد را از بین می‌برند (برای سادگی کار) و همواره پهپاد را در یک ارتفاع خاص در نظر می‌گیرند. اما در سیستم ارائه شده در این مقاله نشانه‌ها از لحاظ میزان ارتفاع هیچ محدودیتی ندارند. تعیین

موقعیت اولیه پهپاد در دقت تخمین‌های الگوریتم تأثیر بهسزایی دارد که ما این مسئله را با اضافه کردن حلقه‌ای به الگوریتم جهت بررسی GPS برای به دست آوردن شرایط اولیه، در چند ثانیه ابتدایی الگوریتم مرتفع کردیم.

مراجع

- [1] Simunek, M., Fontan, F. P., Pechac, P., Otero, F. J. D.: 'Space Diversity Gain in Urban Area Low Elevation Links for Surveillance Applications', IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2013, 61, (12), pp. 6255-6260.
- [2] Marier, J. S., Rabbath, C. A., Léchevin, N.: 'Health-Aware Coverage Control with Application to a Team of Small UAVs', IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2013, 21, (5), pp. 1719-1730.
- [3] Nigam, N., Bieniawski, S., Kroo, I., Vian, J.: 'Control of Multiple UAVs for Persistent Surveillance: Algorithm and Flight Test Results', IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2012, 20, (5), pp. 1236-1251.
- [4] Smith, R., Self, M., Cheeseman, P.: 'Autonomous Robot Vehicles', in Ingemar, J. C., Gordon, T. W. (Ed.): 'Estimating Uncertain Spatial Relationships in Robotics' (Springer New York, 1990), pp. 167-193.
- [5] Bosse, M., Newman, P., Leonard, J., Soika, M., Feiten, W., Teller, S.: 'An Atlas framework for scalable mapping'. In IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Amherst, USA, September 2003, pp. 1899-1906.
- [6] Dissanayake, M.W.M.G., Newman, P., Clark, S., Durrant-Whyte, H.F., Csorba, M.: 'A Solution to the Simultaneous Localization and Map Building (SLAM) Problem', IEEE Trans. on Robotics and Automation, 2001, 17, (3), pp. 229-241.
- [7] Li, X., Aouf, N.: 'Experimental Research on Cooperative vSLAM for UAVs'. Proc. Int. Conf. on Computational Intelligence Communication Systems and Networks (CICSyN), Madrid, Spain, June 2013, pp. 385-390.
- [8] Wang, T., Liang, J., Chen, Y., Zhang, Y., Wang, C.: 'Monocular Visual SLAM for Small UAVs in GPS-denied Environments', IEEE Int. Conf. on Robotics and Biomimetics, Guangzhou, China, December 2012, pp. 896-901.
- [9] Bryson ,M., Sukkarieh, S.: 'Building a Robust Implementation of Bearing-Only Inertial SLAM for a UAV', Journal of Field Robotics, Special issue on SLAM in the field, 2007, 24, (2), pp. 113-143.
- [10] Simon, D.: 'Optimal State Estimation' (John Wiley & Sons, 2006).
- [11] Thrun, S., Lui, Y.: 'Results for outdoor-SLAM using sparse extended information filters', IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Taipei, Taiwan, September 2003, pp. 1227-1233.
- [12] Williams, S.B., Dissanayake, G., Durrant-Whyte, H.: 'Towards Terrain-Aid navigation for Underwater Robotics' Advanced Robotics, 2001, 15, (5), pp. 533-550.
- [13] Olson, E., Leonard, J.J., Teller, S.: 'Robust Range-only Beacon Localization', IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2006, 31, (4), pp. 949-958.
- [14] Kim, J.H., Sukkarieh, S.: 'Autonomous Airborne Navigation in Unknown Terrain Environment', IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems, 2004, 40, (3), pp. 1031-1045.
- [15] Jianli, S., Shuang, P., Yuqiang, W., Xibin, W.: 'Unsecend Fast-Slam for UAV', Int. Conf. on Computer Science and Network Technology, Harbin, China, December 2011, pp. 2529-

2532.

- [16] Min, J., Yekeun, J., Kweon, I. S.: 'Robust visual lock-on and simultaneous localization for an unmanned aerial vehicle', In IEEE/RSJ International Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS), Taipei, Taiwan, October 2010, pp. 93-100.
- [17] Huang, L., He, B., Zhang, T.: 'An Autonomous Navigation Algorithm for Underwater Vehicles Based on Inertial Measurement Units and Sonar', Proc. Int. conf. on Informatics in Control Automation and Robotics, Wuhan, China, March 2010, pp. 311-314.
- [18] Yun, S., Sung, S., Lee, Y. J.: 'Design and Performance test of Relative Navigation of a low cost inertial SLAM', ICROS-SICE International Joint Conference, Fukuoka, Japan, August 2009, pp. 4217-4221.
- [19] Yun, S., Lee, B. J., Lee, Y. J., Sung, S.: 'Real-Time Performance Test of an Vision-based Inertial SLAM', Int. Conf. on Control Automation and Systems, Gyeonggi-do, South Korea , October 2010, pp. 2423-2426.
- [20] Achtelik, M. W., Lynen, S., Weiss, S., Kneip, L., Chli, M., Siegwart, R.: 'Visual-Inertial SLAM for a Small Helicopter in Large Outdoor Environments', IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, Vilamoura, Portugal, October 2012, pp. 2651-2652.
- [21] Estrada, C., Neira, J., Tardos, J.D.: 'Hierarchical SLAM: Real-Time Accur Mapping of Large Environments', IEEE Trans. on Robotics, 2005, 21, (4), pp. 588-596.
- [22] Guivant, J., Neito, J., Masson, F., Nebot, E.: 'Navigation and Mapping in Large Unstructured Environments', International Journal of Robotics Research, 2004, 23, (4-5), pp. 449-472.
- [23] Eustice, R., Singh, H., Leonard, J., Walter, M., ad Ballard, R.: 'Visually Navigating the RMS Titanic with SLAM Information Filters', In Proc. of Robotics Science and Systems, (MIT Press, 2005), pp. 57-64.
- [24] Fang, G., Dissanayake, G., Kwok, N. M., Huang, S.: 'Near Minimum Time Path Planning for Bearing-Only Localization and Mapping', In IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, Edmonton, Canada, August 2005, pp. 850-855.
- [25] Langelaan, J., Rock, S.: 'Navigation of Small UAVs Operating in Forests', In AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, Rhode Island, USA, August 2004, pp. 1-11.
- [26] Lemaire, T., Lacroix, S., Sola,J.: 'A Practical 3D Bearing-only SLAM Algorithm', In IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, Edmonton, Canada, August 2005, pp. 2449-2454.
- [27] Bryson, M. and Sukkarieh, S.: 'Building a Robust Implementation of Bearing-Only Inertial SLAM for a UAV', Journal of Field Robotics,2007, 24, (2), pp. 113-143.
- [28] Li, X., Aouf, N., Nemra, A.: 'Estimation Analysis in VSLAM for UAV Application', IEEE Int. Conf. on Multi sensor Fusion and Integration for Intelligent Systems (MFI),Hamburg, Germany, September 2012, pp. 365-370.
- [29] Li, X., Aouf,N.,Nemra,A.: '3D Mapping based VSLAM for UAVs', In Mediterranean Conf. on Control & Automation (MED),Barcelona, Spain, July 2012, pp. 348-352.
- [30] Chowdhary, G., Johnson, E. N., Magree, D., Wu, A., Shein, A.: 'GPS-denied Indoor and Outdoor Monocular Vision Aided Navigation and Control of Unmanned Aircraft', Journal of Field Robotics, 2013, 30, (3), pp. 415-438.
- [31] Bryson, M.,Sukkarieh, S.: 'Observability analysis and active control for airborne SLAM',IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2008, 44, (1), pp. 261-280.
- [32] Samadzadegan, F., Abdi, G.: 'Autonomous navigation of Unmanned Aerial Vehicles based

on multi-sensor data fusion', Proc. Iranian Conf. on Electrical Engineering (ICEE), Tehran, Iran, May 2012, pp. 868-873.

- [33] Chun, S., Won, D.H., Heo, M. B., Lee Y.J.: 'Performance analysis of an INS/SLAM integrated system with respect to the geometrical arrangement of multiple vision sensors', International Journal of Control, Automation and Systems, 2012, 10, (2), pp. 288-297.
- [34] Won, D.H., Sung, S., Lee, Y.J.: 'UKF based vision aided navigation system with low grade IMU', In Int. Conf. on Control Automation and Systems (ICCAS), Gyeonggi-do, South Korea, October 2010, pp. 2435-2438.
- [35] Wang, C., Wang, T., Liang, J., Chen, Y., Zhang, Y., Wang, C.: 'Monocular visual SLAM for small UAVs in GPS-denied environments', In IEEE Int. Conf. on Robotics and Biomimetics (ROBIO), Guangzhou, China, December 2012, pp. 896-901.
- [36] Mohibullah, W., Julier, S.J.: 'Bearings-only localisation of targets from low-speed UAVs', Proc. Conf. on Information Fusion (FUSION), Edinburgh, UK, July 2010, pp. 1-8.
- [37] Wang, C.L., Wang, T. M., Liang, J. H., Zhang, Y. C., Zhou, Y.: 'Bearing-only visual SLAM for small unmanned aerial vehicles in GPS-denied environments', International Journal of Automation and Computing, 2013, 10, (5), pp. 387-396.
- [38] Montiel, J. M. M., Montano, L.: 'Efficient validation of matching hypotheses using mahalanobis distance', Eng. Applicat. Artif. Intell., 1998, 11, (3), pp. 439-448.